

Die Unterfangung der Türme der St. Katharinenkirche in Braunschweig

Pieper, Klaus

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 32, 1981,
S.111-128



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Die Unterfangung der Türme der St. Katharinenkirche in Braunschweig

Von **Klaus Pieper**, Braunschweig

(eingegangen am 30. 9. 1981)

1. Zustand und Entwicklung

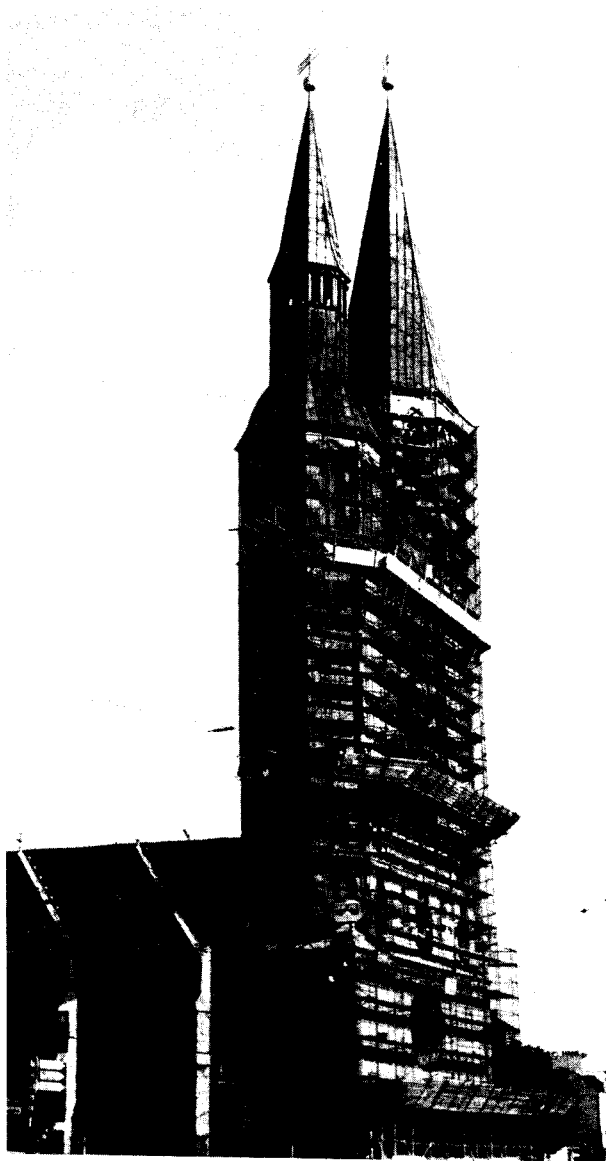
Die Turmfront mit ihren 74 m hohen Spitzen zeigt einen starken Überhang nach Osten, also auf das Schiff zu. Von Nord-Westen her ist dieser Überhang mit dem bloßen Auge deutlich zu erkennen (Bild 1).

Bild 2 zeigt die Neigungen in 10facher Übertreibung. Das Turmgesims in 50,7 m Höhe ist um 82 cm verschoben. Im unteren Teil ist die Neigung noch größer, sie beträgt dort 2%. Das weist darauf hin, daß erste Kippbewegungen schon während der Bauzeit aufgetreten sind und man die weiteren Bauteile dann wieder senkrecht errichtet hat. In gleicher Weise wurde vor wenigen Jahren die Turmspitze wieder senkrecht auf den schiefen Unterbau gestellt.

Im Vergleich zu anderen Türmen ist diese Neigung gar nicht so groß. Die 120 m hohen Türme der Marienkirche in Lübeck haben eine Neigung von 4%, und der berühmte Schiefe Turm zu Pisa gar eine solche von 10%. Auch das Aufrichten der Türme nach ersten Setzungen während der Bauzeit ist vielfach zu beobachten, z. B. bei den romanischen Türmen des Domes zu Lübeck und wiederum auch beim Turm zu Pisa. Im Unterschied zu den genannten Türmen bewegen sich die der Katharinenkirche immer noch, ja sogar mit zunehmender Geschwindigkeit. Außerdem sind sie die einzigen, die durch ihre Bewegungen auf das Kirchenschiff drücken und dort Schäden erzeugen.

Wenn die 82 cm Überhang in den 600 Jahren des Bestehens der Türme gleichmäßig entstanden wären, dann würde das einer Bewegung von 1,4 mm im Jahr gleichkommen. Messungen vom Beginn unseres Jahrhunderts an lassen auf Bewegungen von etwa dreifacher Größe schließen. Die Kirche muß also in der Zwischenzeit zur Ruhe gekommen und in unserer Zeit durch neue äußere Einwirkungen wieder in Bewegung geraten sein.

Da sich am Untergrund, besonders am Grundwasser in neuerer Zeit nichts geändert hat, muß man die Ursachen für die neuen Schäden wohl in den wachsenden Erschütterungen durch den modernen Verkehr suchen. Die Stöße, die beim Befahren der Schienenkreuzung der Straßenbahn auf dem Hagenmarkt entstehen, kann man in der Tat in den Fußsohlen spüren, wenn man neben den Türmen steht. Schon 1963 wurden daher die Erschütterungen des Bauwerkes durch den Verkehr von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt gemessen. Es ergaben sich sowohl aus dem Lastwagenverkehr als auch aus den Schienenfahrzeugen Schwingungen der Türme, die

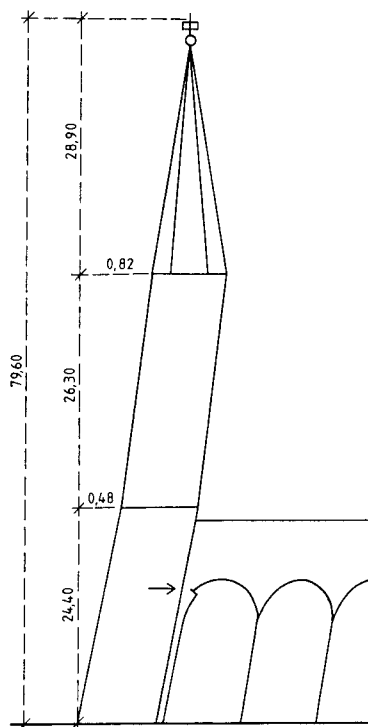


*Bild 1:
Kirche von Norden her*

zwar durchaus Bewegungen in dem feinsandigen wassergesättigten Untergrund hervorrufen können, die aber andererseits doch so klein waren, daß nach der gängigen Rechtsprechung eine Schadenersatzklage keine Aussicht auf Erfolg gehabt haben würde.

Ein Druckgefälle von $0,1 \text{ kN/cm}^2$ ausgehend, mit Auslaufen des Druckes auf der entlasteten Seite auf etwa 0 und bei schwimmsandähnlichem Untergrund, kann, wenn noch Druckschwankungen dazukommen, durch sehr kleine Schwingungen bereits zu Bodenbewegungen nach der entlasteten Seite hin führen. Trotzdem gibt es einen Rechtsanspruch auf Schadenersatz erst, wenn die Erschütterungen sich in den Stufen der Erdbebenskala ausdrücken lassen.

Durch die zunehmende Neigung der Türme drückten diese auf die Gewölbe. Die Bewegungen waren bei dem kleineren Hebelarm natürlich sehr viel geringer, und ein Teil dieser Bewegung wurde auch noch in einem nicht unerheblichen Schaden im ersten Gewölbefeld aufgezehrt. Trotzdem aber stehen alle Pfeiler des Kirchenschiffes



DIE TÜRME NEIGEN SICH NACH OSTEN
(10-FACH VERZERRT)

Bild 2:
Schiefstellung der Türme

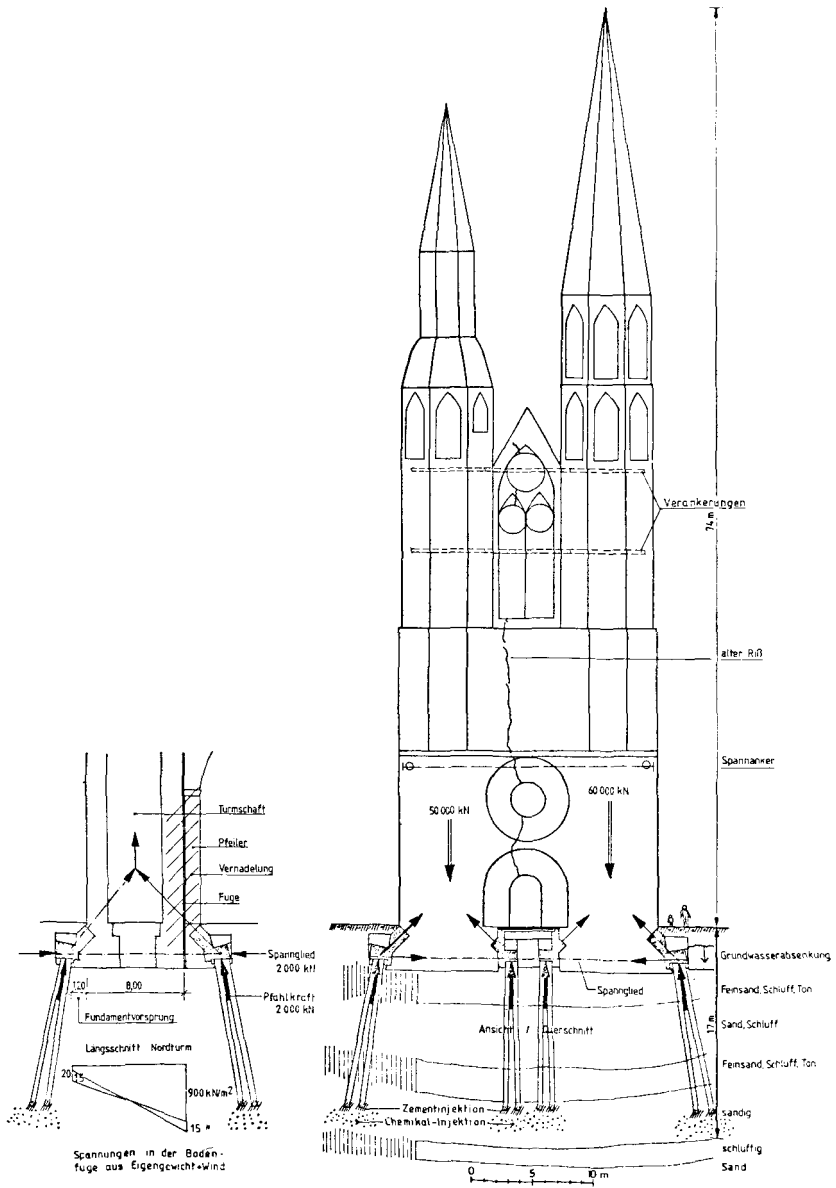


Bild 3:
Ansicht und Schnitt der Türme, Baugrund, Unterfangung und Kräftefluß

bis zum Chor hin nach Osten geneigt, was nur von den Turmbewegungen herrühren kann (Bild 2). Auch sind einige Risse in den Gewölben eindeutig auf die Unterschiede in den Bewegungen der inneren Pfeilerreihe und der Außenwände zurückzuführen.

In Nord-Süd-Richtung waren die Bewegungen der Türme sehr viel geringer, da sie aber Risse erzeugten, sehr viel auffälliger (Bild 3). Die Türme haben sich ein wenig auseinander bewegt, und nach der Teilung der Front in zwei unabhängig voneinander wirkende Bauwerke haben sich aus den Windlasten und vor allem aus den parallel zur Front schwingenden Glocken Scherbewegungen ergeben, die zum weiteren Aufklaffen der Risse von der Glockenstube durch Rose und Portal führten und dort in dem Maßwerk erhebliche Zerstörung hervorriefen.

Während der Unterfangungsarbeiten wurde erst festgestellt, daß dieser Riß sowohl auf der West- als auch auf der Ostseite in erheblicher Breite auch durch die Fundamente reichte, so daß die Türme auch in den Fundamenten als Einzelbauwerke aufzufassen waren. Die Bodenpressungen (Bild 3) sind noch unter der Annahme eines Zusammenwirkens ermittelt. Durch die Maßnahme zur Unterfangung sind die Türme heute wieder zusammengebunden.

Ohne Zweifel hätten sowohl die Türme als auch das Kirchenschiff die Bewegungen noch für längere Zeit aushalten können, ohne daß eine akute Gefahr aufgetreten wäre. Man hätte also die durchaus als schwierig bekannten Unterfangungsarbeiten ohne weiteres auf die nächste Generation verschieben und dabei sogar noch die Hoffnung haben können, daß bis zu der Zeit neue, bessere Techniken für solche Aufgaben entwickelt werden würden. Gegen einen solchen Aufschub sprachen aber eine Reihe schwerwiegender Gesichtspunkte.

Es bestand die Absicht, die Straßenbahn, deren Gleisachse damals etwa 11 m von der Turmfront ablag, noch um 5 m näher an das Bauwerk heranzurücken. Dann wären Unterfangungsarbeiten zwischen befahrenem Gleis und dem Grundwasser kaum mehr möglich gewesen.

Die Finanzierung der Arbeiten war damals möglich, wobei der Gesichtspunkt, daß die Verkehrsregelung die Arbeit notwendig machte und dadurch Zuschüsse erreicht werden konnten, sehr wichtig war. Heute, 5 Jahre nach Beendigung der Arbeit, wäre eine Finanzierung kaum mehr möglich.

Selbstverständlich war auch zu berücksichtigen, daß bei weiterem Zuwarten die Neigungen und die Schäden immer größer und dadurch die Maßnahmen immer schwieriger werden würden.

Wichtig für die Entscheidung zum Beginn der Arbeiten war die Tatsache, daß zu der Zeit Ingenieure und Poliere zur Verfügung standen, die Erfahrungen mit ähnlichen Maßnahmen in Hamburg und Lübeck hatten.

2. Die Fundamente der Türme

Die Fundamente reichen bis in 3,6 m Tiefe, das heißt etwa 2,5 m ins Grundwasser. Ihre Herstellung bei ähnlichen Grundwasserverhältnissen muß für die Gotik eine beachtliche Leistung gewesen sein.

Wie bei vielen alten Bauwerken hat man, um in dem weichen Boden eine feste Plattform für die ersten Maurerarbeiten zu bekommen, Holzpfähle eingeschlagen und darüber Holzbohlen gelegt. Die Pfähle konnten bei der damaligen Rammtechnik weder sehr dick noch sehr lang sein. Sie sollten ja auch nicht eigentlich das Bauwerk tragen, sondern vor allem den Bodenbelag. Solche Pfähle sind in Schürfgruben festgestellt worden. Das aufgehende Mauerwerk ist in Bruchsteinen und Kalkmörtel auch unter der Bodenoberfläche recht gut gemauert, was bei anderen Bauwerken nicht immer der Fall ist.

Ein Fundamentvorsprung von etwa 1,30 m ist auf den Außenseiten ringsum vorhanden, fehlt aber auf der Ostseite völlig. Selbst die Fundamente der in der Ostfront stehenden Gewölbepfeiler sind durch Fugen von den Türmen getrennt.

Diese Pfeiler mußten daher bei der Unterfangung in zwei Richtungen mit den Türmen vernadelt werden. Bei der Ausschachtung mußte das Gewicht der Gewölbe und der Pfeiler an den Turm gehängt werden, und beim Anspannen der Pfähle mußten dann große, nach oben gerichtete Lasten in die Türme übertragen werden.

Die Unsymmetrie des Fundamentvorsprungs hat wohl von Anfang an sehr unterschiedliche Bodenbelastungen im Westen und im Osten hervorgerufen und damit bei dem zunächst sehr nachgiebigen Baugrund schon beim Aufbringen der ersten Lasten zu den ersten ungleichmäßigen Setzungen geführt.

3. Baugrund und Baugrunduntersuchungen

Der Baugrund unter den Türmen besteht bis in Tiefen von 18 m aus Feinsanden und Schluffen, die in wechselnden Schichten verstärkt aus Schluff sind, der noch organisch stark verschmutzt ist. Erst unter 18 m Tiefe stehen tragfähige Grobsande an. Direkt unter den Türmen liegen schwarze Schluffschichten, die durch organische Beimengungen stark riechen. Der Verlauf der Schichten wechselt, und die Übergänge sind meist fließend.

Der Baugrund wurde vor und während der Unterfangungsarbeiten mit allen Mitteln des modernen Grundbaues untersucht.

Zunächst wurden normale Erkundungsbohrungen mit offenen Rohren ausgeführt, aus denen der Boden bis auf seltene, ungestörte Proben nur durch die Bohrarbeiten stark vermischt entnommen werden kann.

Später wurden Schlauchkernbohrungen durchgeführt, die auf ganze Tiefe ein Bild des ungestörten Bodens ergeben. Daneben wurden Schlag-Sondierungen und Druck-Sondierungen vorgenommen.

Im Prinzip stimmen die Ergebnisse alle überein. Sie bringen entsprechend den verschiedenen Ansatzstellen und den wechselnden Schichtdicken kleine Unterschiede in den Schichtgrenzen und auch kleine Unterschiede in der Beurteilung der Steifigkeit der verschiedenen Böden.

Wenn heute an dieser Stelle ein Neubau ausgeführt werden würde, dann würden die zulässigen Pressungen in der Größenordnung zwischen 0,01 und 0,02 kN/cm² liegen, und es müßte mit erheblichen Setzungen gerechnet werden.

4. Das Grundwasser

Das Grundwasser steht mit geringen jahreszeitlichen Differenzen etwa 1 m unter der Bodenoberfläche. Es mußte durch mehrere Brunnen um etwa 1,7 m abgesenkt werden. Die Absenkung wurde bewußt nicht bis unter die Turmfundamente getrieben, da sonst mit erheblichen Setzungen zu rechnen gewesen wäre.

Durch Feinnivellements wurden die Reaktionen von Nachbargebäuden überwacht. Setzungen sind dort nicht aufgetreten, während an den Türmen beim Absenken des Grundwassers erste zusätzliche Bewegungen auftraten.

5. Die Belastungen

Die beiden Türme sind verschieden hoch und daher auch verschieden schwer. Der Nordturm bringt etwa 50 000 kN, der Südturm 60 000 kN auf das Fundament. Die Gesamtlast steht exzentrisch zum Schwerpunkt der Fundamentfläche, der durch die Einseitigkeit des Fundamentvorsprunges stark nach Westen verschoben ist, während die Last durch den Überhang außermittig nach Südost liegt.

Bild 3 zeigt die daraus entstehenden Spannungen in der Bodenfuge und dazu die Änderungen durch Wind.

Die Spannungen auf der Ostseite in Höhe von 0,1 kN/cm², während auf der Westseite schon fast ein Abheben eintritt, müssen zum Kippen des Bauwerkes führen. Da das Kippen eine weitere Verlagerung des Lastschwerpunktes nach Osten, also eine Vergrößerung des Drehmomentes bedeutet, das wiederum zur Erhöhung der Spannungen führt, kann man schon von einem Fließzustand sprechen.

6. Grundbruchprobleme

Wenn auf solchem Boden so einseitige Belastungen entstehen, dann muß man nach der Grundbruchsicherheit fragen. Sie wurde vom Baugrundberater Dr. Steinfeld, Hamburg, für den bestehenden Bau noch für ausreichend befunden. Der rings um das Bauwerk notwendige Aushubgraben von 3 m Tiefe und 4 m Breite und die Erkenntnis, daß die Turmfront kein zusammenhängendes Bauwerk war, sondern die beiden Türme für sich standen, ließen einige Bedenken entstehen. Die rechnerische Sicherheit ging auf 1,3 zurück. Es wurde daher festgelegt, daß zunächst nur die Grabungen zwischen den Türmen sowie im Norden und Süden ausgeführt werden durften und erst nach dem Spannen der Unterfangungen in diesen Bereichen die Westseite geöffnet werden konnte. Da aber zum Einziehen der Spannglieder beide Seiten offen sein mußten, wurde jedenfalls verlangt, daß vor dem Öffnen der Ostseite die Stahlbetonfundamente auf der Westseite fertig sein mußten. Auf der Ostseite sollte der Nordturm vor dem Südturm angefaßt werden. Diese Abfolge der Arbeiten ergab eine erhebliche Verlängerung der Bauzeit, was vor allem die Kosten der Grundwasserabsenkung vergrößerte.

Setzungsmessungen im Abstand von 10 Tagen wurden angeordnet, um beginnende Bewegungen rechtzeitig erkennen zu können.

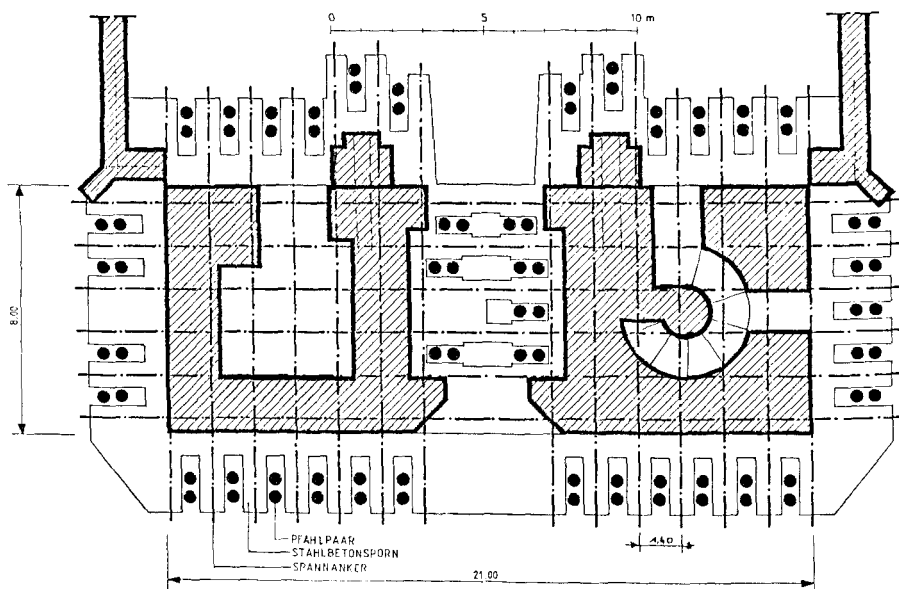
7. Sicherung des Zusammenhaltes der Türme

Zur Sicherung der Türme gegen ein weiteres Auseinanderklaffen in Nord-Süd-Richtung waren schon einige Jahre vor der Unterfangung Stahlbetondecken oberhalb und unterhalb der Glockenstube eingebaut worden. Die Platten in der Glockenstube und innerhalb der Türme wurden zugfest miteinander verbunden und durch Vernadeldung fest in das Mauerwerk eingebunden. Damit sind die Türme mit großem Hebelarm gelenkig zusammengehalten.

Es wurden dann noch oberhalb der Rose Spannanker eingebaut, die an dieser Stelle die beiden auseinandergerissenen Teile fest zusammenpreßten. Damit war Vorsorge getroffen, daß die Türme auch dann nicht wieder auseinanderreißen konnten, wenn beim Anspannen der Pfähle kleine Differenzen zwischen den Lasten und den stützenden Kräften auftreten sollten. Außerdem wurde das Mauerwerk durch Einbau von Nadelankern an den Stellen vergütet, an denen durch die Unterfangung größere Beanspruchungen auftreten würden als vorher.

8. Prinzip der Unterfangung

Da der Boden unter den Türmen für eine chemische Bodenverfestigung zu feinkörnig und zu sehr organisch verschmutzt war, kam nur eine Unterfangung in Frage.



GRUNDRISS DER TÜRME UND LAGE DER PFÄHLE

Bild 4:

Anordnung der Pfähle und des Fundamentkragens im Grundriß

Die Wahl zwischen Flachfundamenten und Pfählen als neue Fundamente wurde dadurch entschieden, daß die Pfähle beim Absetzen der Lasten in größerer Tiefe ein sehr steifes Widerlager sein würden, während Flachfundamente durch die weichen Bodenschichten sich durch längere Zeit setzen müßten.

Bei der Wahl des Pfahlsystemes schieden alle Ramppfähle von vornherein aus, da die Türme solchen Erschütterungen nicht ausgesetzt werden durften. Auch alle Bohrpfahlsysteme, bei denen in irgendeiner Art vor der Verrohrung vorgebohrt werden muß, also zum Beispiel alle Fußpfähle, kamen nicht in Frage, da durch das Vorbohren, wie es sich bei einem späteren Versuch auch zeigte, in dem weichen Boden große Setzungen zu erwarten waren.

Auch ein Drehen der Pfähle sollte vermieden werden. Gewählt wurden Pfähle, bei denen Rohre mit hydraulischen Pressen in den Boden gedrückt, ausgebohrt und mit Beton verfüllt wurden. Die Zahl der Pfähle war durch den notwendigen Abstand untereinander und durch den Umfang der Türme bestimmt.

Bild 4 zeigt die gewählte Anordnung von Pfahlpaaren. Durch die am Nordturm fehlenden Pfähle wurde der Schwerpunkt der Pfahlkräfte dem Schwerpunkt der Last angenähert.

Von der aufzunehmenden Last von 110 000 kN sollten etwa 25 % auf den alten Fundamenten verbleiben, so daß 80 000 kN aufgenommen werden mußten. Bei 80 Pfählen ergab sich damit eine Tragkraft je Pfahl von 1000 kN.

Ein Einbau der Pfähle direkt unter dem Mauerwerk der Türme kam nicht in Frage. Bild 4 zeigt deutlich, daß einerseits der Platz nicht ausgereicht hätte und daß andererseits vom Mauerwerk nicht mehr viel übriggeblieben wäre.

Es mußte daher rings um den Turm ein neuer Fundamentkranz gebaut werden, in dem die Pfähle mit Vorspannung verankert werden konnten, und der in der Lage sein mußte, Pfahllasten, Querkraft und Moment, so in das Turmmauerwerk einzuleiten, daß dieses nicht überlastet werden würde. Das Bild zeigt den Grundriß dieses „Kragens“ mit den charakteristischen Spornen, zwischen denen die Pfähle sitzen und den Achsen der Spannglieder, mit denen die Sporne gegen das aus der Lage der Pfähle entstehende Kragmoment vorgespannt wurden. Das Bild zeigt auch, daß es notwendig wurde, die beiden Strebepfeiler des Kirchenschiffes auf dem neuen Fundament abzusetzen. Das Mauerwerk der beiden Pfeiler wurde mit den angrenzenden Wänden tief vernadelt, so daß die Pfeiler kurzzeitig untergraben werden konnten.

Die Vernadelung der beiden Pfeiler des Schiffes mit den Turmwänden ist bereits erwähnt und in Bild 3 dargestellt. Bild 3 zeigt auch, wie die Gewichte der Türme in Längs- und Querrichtung aufgespalten und mit Hilfe der als Zuganker wirkenden Spannglieder in die Pfähle geleitet werden.

9. Vorbereitungen

Aus dem Bereich vor der Kirche mußten vor Baubeginn alle Leitungen entfernt oder stillgelegt werden. Offensichtlich wußten aber die Stadtwerke über ihr Leitungsnetz selbst nicht ausreichend Bescheid, denn beim Beginn des Aushubes gab es eine

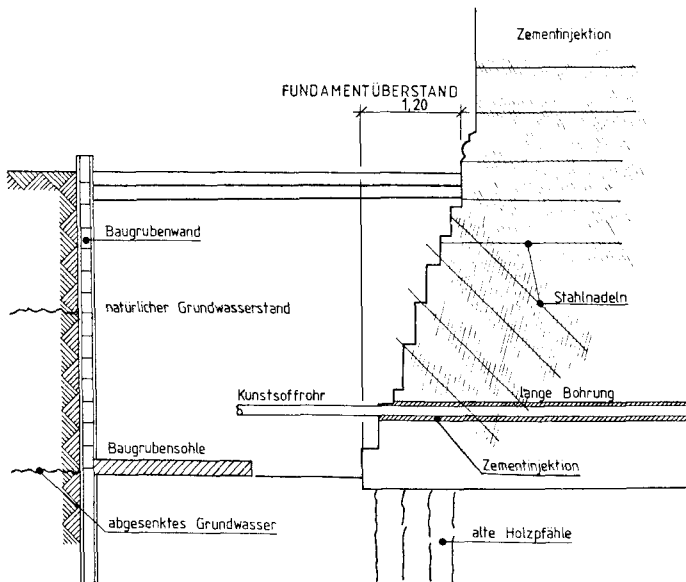
Überschwemmung, weil ein großes Wasserrohr, das leer sein sollte, doch noch unter Druck stand.

Schwierigkeiten bereitete eine internationale Fernsprechleitung, die vor den Türmen lag. Sie konnte wegen der Abhörsicherheit nicht provisorisch verlegt, sondern mußte in weitem Bogen um die Baustelle herumgeleitet werden. Allein dies bedeutete eine Verzögerung des Baubeginns um ein Vierteljahr.

Elektrische Kabel und Schaltkästen wurden verlegt. Ein Bauzaun schloß die Baustelle und die Lagerplätze ab.

10. Baugrube

Zur Abgrenzung der Baugrube wurde eine „Berliner Wand“ aus I-Profilen mit einer Ausfachung durch Stahlbetonbohlen verwendet (Bild 5). Da auf der Westseite die Straßenbahn unmittelbar neben der Wand fuhr, mußte diese sehr gut abgesteift werden, damit keine Setzungen im Boden auftraten. Die hinderlichen Absteifungen wurden dann während der Arbeiten jeweils entsprechend ausgewechselt. Die Baugrube wurde mit einer Betonsohle versehen, um ein Aufweichen des Baugrundes zu vermeiden. Ein Aufwühlen des schlammigen Bodens hätte die Grundbruchgefahr erhöht. Nur die Öffnungen für die Pfähle blieben ausgespart.



BAUGRUBE UND VORBEREITUNG DES TURMFUNDAMENTES

Bild 5:

Baugrube, Grundwasserabsenkung, Vernadelung und Bohrung für die Spannglieder

11. Vorbereitung der alten Fundamente

Um das alte Mauerwerk beim Anschluß der Pfahlkräfte nicht zu überlasten, wurde es nach Bild 5 durch eine große Zahl von Injektionen und Stahlnadeln in seiner Tragfähigkeit verbessert. Die Stahlnadeln werden durch die Zementinjektion fest mit dem Mauerwerk verbunden und geben diesem dadurch eine gewisse Zugfestigkeit, die das Mauerwerk ja sonst überhaupt nicht besitzt. Durch das Injizieren von Zementschlänpe mit Drücken bis zu 6 atü werden alle Hohlräume und Risse im Mauerwerk ausgefüllt. Dadurch wird die Druckfestigkeit verbessert. Erfahrungsgemäß wird die Bruchfestigkeit von Mauerwerk durch solche Maßnahmen um 50% erhöht. Zu den Vorbereitungen gehörten auch die 22 m langen Bohrungen von 15 cm Durchmesser für die Spannanker. Diese Bohrungen durften auf der Gegenseite nicht mehr als 10 cm von ihrer Achse abweichen, weil sonst in den Spornen kein Platz für die Verankerung mehr war. Es gehörte zu den erstaunlichen Fähigkeiten der Poliere, solche Bohrungen in dem recht unterschiedlich harten Mauerwerk so anzusetzen und zu führen, daß solche Genauigkeiten erreicht wurden.

Der Hohlraum zwischen dem in die Bohrung eingeführten Kunststoffrohr und dem Mauerwerk wurde ebenfalls mit Zement verpreßt. Gegen die Verwendung von Kunststoff an dieser Stelle bestehen keine Bedenken, da der Kunststoff völlig vom

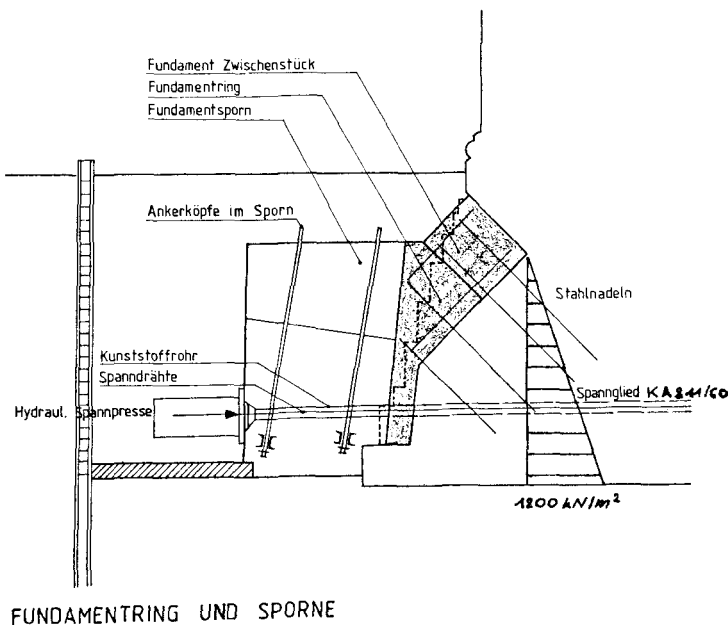


Bild 6:
Stahlbetonfundamente und Spannglied

Sauerstoff der Luft und von allen Strahlungen abgeschlossen ist und auch im fertigen Bauwerk keine tragende Funktion mehr hat. Sonst ist bei Sicherungskonstruktionen, die eine Lebensdauer von mindestens 300 Jahren haben sollen, das Verwenden von Kunststoff recht problematisch.

12. Fundamentring und Sporne

Als nächster Arbeitsgang wurde der Fundamentring nach Bild 6 ausgestemmt und mit den Spornen betoniert. Der Ring hat eine starke Längsbewehrung und ist durch die Nadeln mit dem Mauerwerk verbunden. Aus dem Ring kragen die hochbewehrten Sporne aus. Sie enthalten die Verankerung für die Spannglieder und Anker in Richtung der Pfähle mit einer Tragkraft von je 1000 kN.

Nach dem Erhärten des Betons wurden die Spannglieder auf eine Last von 2000 kN vorgespannt und sehr sorgfältig mit Zementschlänpe verpreßt. Von der Güte dieses Verpressens hängt die Lebensdauer der Spannglieder ausschlaggebend ab. Nur voll in Zementmörtel gehüllte Spanndrähte sind gegen Korrosion gesichert. Die Spannungen im Mauerwerk, die durch die Spannglieder hervorgerufen wurden, betrugen nur 0,12 kN/cm². Zuletzt wurde das Fundamentzwischenstück ausgestemmt und betoniert. Da es sehr tief in das alte Mauerwerk eingreift, durfte es nur in 2 m breiten Stücken und jeweils erst nach dem Erhärten der Nachbarstücke hergestellt werden.

Mit diesem Arbeitsgang waren die Sporne bereit, aus den Pfahlböcken je 2000 kN vertikal gerichtete Kraft aufzunehmen. Sie konnten aber auch für das Einbringen der einzelnen Rohre mit diesen 2000 kN beansprucht werden.

13. Das Einbringen der Pfahlrohre

Die Stahlrohre, in denen die Pfähle hergestellt wurden, sind in Schüssen von 2 m auf der Baustelle angeliefert und in dem Raum zwischen den Spornen entsprechend zusammengeschweißt worden. Sie haben 50 cm Durchmesser und 8 mm Wanddicke. Zum Einpressen der Pfähle wurden nach Bild 7 auf den Spornen zwei Stahlrahmen montiert, in die 4 hydraulische Pressen von je 500 kN Druckkraft eingebaut wurden. Über zwei Querträger gaben diese Pressen ihre Kraft an einen Rohrkopf ab, der lose über das Rohrende gestülpt war. Durch die Umlenkung der Pressenkraft auf 4 Zugkräfte konnte die Krafteinleitung besser zentriert werden, und es wurde der Raum über dem Rohr freigehalten, so daß von oben her mit der Schappe oder dem Ventilbohrer der Boden aus dem Rohr herausgebohrt werden konnte, ohne daß die Presseneinrichtung abgebaut werden mußte. Die Pressen hatten 40 cm Hubhöhe. Das Anpassen an die Lage des Rohrkopfes erfolgte in den Zugstangen zwischen Querträger und Rohrkopf.

Diese Einrichtung wurde allerdings erst während der Arbeiten und größtenteils auf der Baustelle selbst entwickelt und zusammengeschweißt, und selbst in diesem Endzustand bereitete das Einpressen der Rohre immer noch große Schwierigkeiten. Die Wandreibung stieg sehr schnell so stark an, daß die vollen 2000 kN aufgebracht

werden mußten, ehe das Rohr in den Boden einsank. Der in das Rohr eingedrungene Boden mußte möglichst weit herausgebohrt werden, um die Wandreibung jedenfalls im Rohrrinneren klein zu halten. Andererseits mußte immer ein ausreichender Pfropfen im Rohr verbleiben, damit der Boden nicht unter dem äußeren Druck hochstieg und dadurch Hohlräume im Boden entstanden. Obwohl der Wasserspiegel das Rohr immer bis über die Höhe der Sporne füllte, trat ein solches „Eintreiben“ auf, sobald der Pfropfen kleiner wurde als 1 m.

Das Rohr stand von der Baugrubensohle aus frei, hatte also eine große Knicklänge. Dies führte mehrmals zum Ausknicken von Rohren, die dann herausgeschweißt werden mußten, da sie nicht mehr zu richten waren. Zeitweise ging das Eindringen in ganz kurzen Rucken vor sich, was zu unerwünschten Erschütterungen führte. Über 14 m Tiefe ließen sich die Pfähle trotz aller Mühe nicht eindrücken, so daß die Absicht, auch die letzte Schluffschicht zu durchfahren, aufgegeben werden mußte. Das brachte ein vergrößertes Risiko mit sich, daß nach dem Anspannen größere und lang anhaltende Setzungen auftreten könnten.

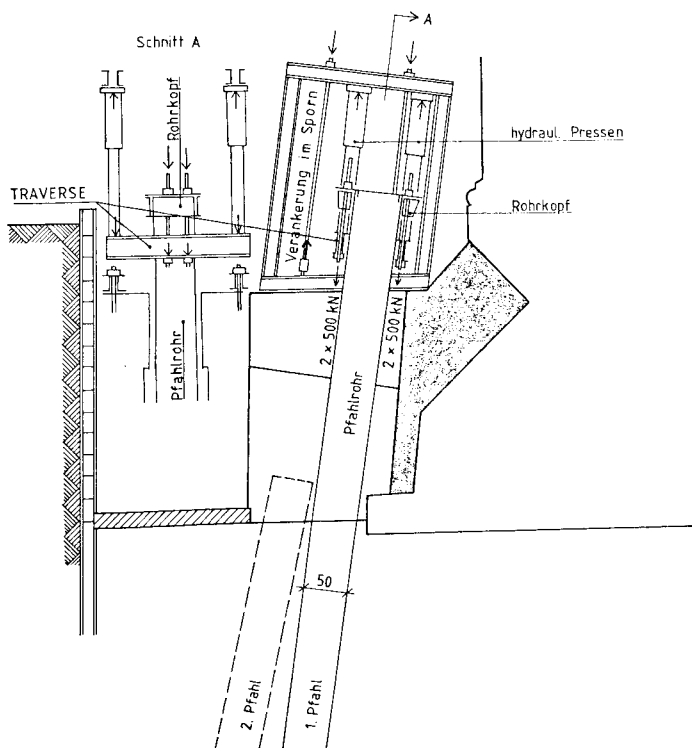


Bild 7:
Einpressen der Pfahlrohre

Eine der international tätigen Bohrpfahlfirmen, die von unseren Schwierigkeiten erfuhr, stellte uns ein von ihr entwickeltes, 5 t schweres Bohrgerät zur Verfügung, mit dem sie glaubte, alle solche Schwierigkeiten überwinden zu können. Das schwere Gerät wurde mit viel Mühe in Stellung gebracht und begann seine mit Spannung und Hoffnung betrachtete Arbeit. Aber bereits nach 4 m Eindringtiefe hob es sein ganzes Gewicht aus und begann am Pfahl hochzuklettern, der sich nicht mehr rührte. Es ist eben doch wohl ein großer Unterschied, ob man im Verdichtungsbereich eines schweren Bauwerkes mit hohen Bodendrücken arbeitet oder auf der freien Wiese, wo auch Setzungen des Baugrundes keine Rolle spielen. Man mußte zu der für diesen Bau entwickelten Bohrmethode zurückkehren und die Schwierigkeiten durch den Einsatz der Bohrkolonne und viel Geduld überwinden.

14. Das Herstellen der Pfähle

Als Ausgleich für die nicht erreichbare Pfahltiefe wurden die Pfähle nach Bild 8 mit Fußverbreiterungen versehen. Nach dem Erreichen der Endtiefe wurden die Pfähle zunächst so weit ausgebohrt, wie dies ohne Gefahr des Eintreibens möglich war. Dann wurde durch den Bodenkern hindurch eine Lanze in den Untergrund ge-

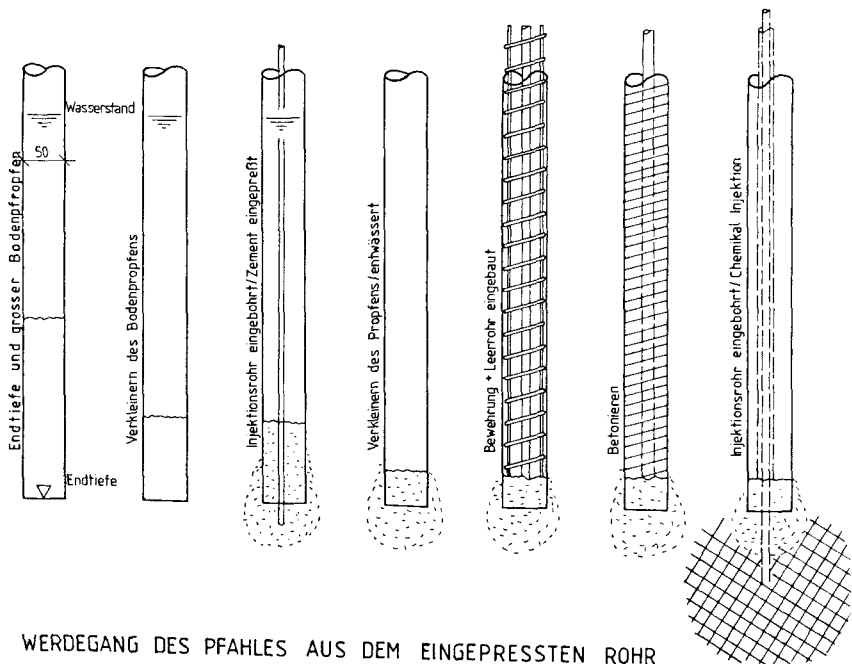


Bild 8:

Herstellen eines Pfahles

trieben und Zementmilch eingepreßt. Die Reichweite dieser Injektion konnte nicht groß sein, da die feinen Poren des schluffigen Bodens sich sehr schnell mit Zementkörnern zusetzten. Es wurde aber eine Abdichtung des Rohres gegen das Grundwasser erreicht, so daß trotz einer weiteren Verkleinerung des Pfropfens das Rohr leergepumpt werden konnte. Nun wurde eine Bewehrung eingebracht und dazu noch einmal ein Leerrohr eingebaut. Danach wurde das Rohr sehr sorgfältig ausbetoniert. Nach dem Erhärten des Betons konnte durch das Leerrohr hindurch der mit Zement verfestigte Pfropfen und Fuß durchbohrt werden. Dann wurde in den zwar sehr feinkörnigen, aber nicht mehr verschmutzten Boden nach dem MONODUR-Verfahren Wasserglas unter hohen Drücken eingepreßt, das zu einer Verkieselung der Sandkörner führte und damit einen festen Fuß ergab. Da die Stabilisatoren, die ein frühzeitiges Ausfallen der Kieselsäuregele verhindern, sehr gesundheitsschädlich sind, mußte bei den hohen Einpreßdrücken mit Schutzanzügen und Masken gearbeitet werden, was wiederum eine unangenehme Belastung für die Mannschaft bedeutete.

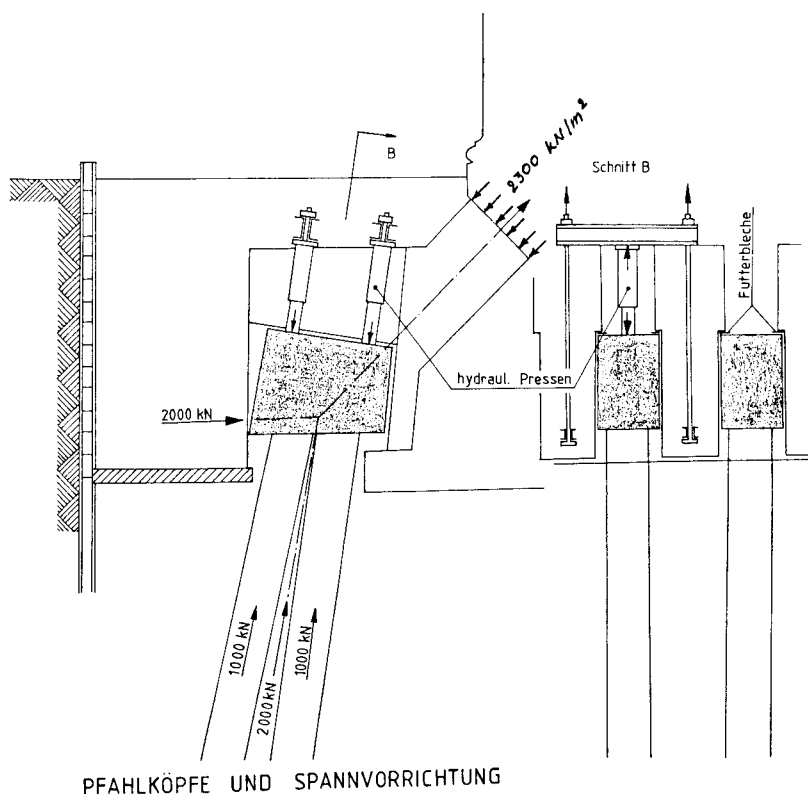


Bild 9:
Spannen der Pfähle

15. Das Vorspannen der Pfähle

Nach dem Fertigstellen der Pfähle wurden die Pfahlköpfe gekappt und jedes Pfahlpaar durch einen Stahlbeton-Kopf zusammengefaßt. Nach dem Erhärten dieses Kopfes konnten dann nach Bild 9 wiederum durch hydraulische Pressen, die sich gegen die in den Spornen vorhandenen Zuganker abstützten, die endgültigen Lasten aufgebracht werden. Die dabei im alten Mauerwerk entstehenden Spannungen stiegen bis auf $0,23 \text{ kN/cm}^2$. Eine solche Beanspruchung konnte dem Bruchsteinmauerwerk nur nach der sorgfältigen Vernadelung und Zementinjektion zugemutet werden.

Nachdem die Pfähle beim Einpressen mit je 2000 kN belastet worden waren, enthielt diese Last einschließlich der Wirkung des Pfahlfußes schon etwa dreifache Sicherheit gegenüber dem weiteren Einsinken der Pfähle, und es wurden alle schnell auftretenden Setzungen vorweggenommen. Die Last wurde dann auf etwa die Hälfte reduziert, und bei diesem Druck wurden die zwischen dem Pfahlkopf und den Spornen entstandenen Spalten sorgfältig mit Stahlblechen ausgekeilt. Beim Wegnehmen der Pressen verblieb über diesen Weg die Last im Sporn. Das Reduzieren der Pfahllasten gegenüber den planmäßigen Maximallasten sollte die nachträglichen Setzungen vermindern, da sowohl vom Boden, dem ja nun wieder ein größerer Anteil der Last zufiel, als auch von den Pfählen bei nur halber Last angenommen werden konnte, daß keine Nachsetzungen eintreten würden. Die Überlegung der Baugrundfachleute hat sich bewährt, seit dem endgültigen Spannen sind in 4 Jahren praktisch keine Setzungen mehr aufgetreten.

Das bedeutet nicht, daß man für die ganze Konstruktion mit der halben Tragfähigkeit ausgekommen wäre. Die volle Traglast wurde ja beim Einbringen der Pfähle benötigt und wurde auch beim Vorspannen der Pfähle zum Vermeiden von Anfangsetzungen ausgenutzt. Sie war außerdem zur Sicherheit für den Fall notwendig, daß der Baugrund auch die reduzierte Last nicht ohne Setzungen aufnehmen würde.

16. Während der Bauzeit aufgetretene Schäden

Erstmals beim Absenken des Grundwassers traten während der Bauzeit erhebliche Senkungen der Türme auf. Wenn der Grundwasserspiegel sinkt, fällt der Auftrieb des Bodens in den entsprechenden Schichten weg, und der Untergrund wird entsprechend belastet. Das ist eine bekannte Erfahrung.

Weitere Senkungen waren mit dem Einpressen der Pfähle verbunden. Beim planmäßigen Verlauf wurden ja durch die hohen Preßdrücke die Schichten in der Umgebung jedes Pfahles zusätzlich zur noch vorhandenen Last aus dem Turm beansprucht. Dadurch waren Setzungen unvermeidbar. Wenn dann noch beim ruckweisen Eindringen Erschütterungen hinzukamen oder ein geringes Eintreiben des Bodens in die Rohre nicht vermieden werden konnte, dann mußten weitere Setzungen entstehen. Insgesamt haben sich die Türme während der Arbeit um etwa 4 cm gesetzt, das ist doppelt soviel, als vorausgesehen war. Die Setzungen waren aber gleichmäßig, so daß kein weiteres Kippen der Türme eintrat.

Aber die Setzungen hatten natürlich in dem angrenzenden Kirchenschiff erhebliche Schäden zur Folge. Die Setzungsdifferenz zwischen den Türmen und dem ersten Pfeilerpaar, das sich kaum noch bewegte, führte zu erheblichen Rissen in den Gewölben und in den Außenwänden. Während der Arbeit wurden daher die Gewölbe durch ein Gerüst gesichert, das bei einem Bruch die Steinmassen aufgefangen hätte. Da ein solcher Bruch nicht eintrat, konnten die Gewölbekappen, nachdem Ruhe eingetreten war, durch Auspressen der Risse mit Zement und durch eine zugfeste Verbindung von Gewölbekappen und Rippen gesichert werden.

Auch in den Wänden, wo die Risse natürlich vorwiegend durch die Fenster und die Portale gingen, wurden alle Risse kraftschlüssig ausgefüllt und die reparierten Flächen nach außen hin durch den Steinmetzen überarbeitet.

Während der ganzen Bauzeit war das Kirchenschiff durch eine dichte Staubwand unterteilt, so daß im verkürzten Schiff und im Chor laufend Gottesdienst abgehalten werden konnte.

Die aus der Nachkriegszeit stammende Orgel mußte für die Arbeiten ganz ausgebaut werden. Sie wurde nach der Fertigstellung durch eine neue, nun nicht mehr auf einer Empore, sondern direkt auf dem Kirchenfußboden stehende große Orgel ersetzt.

17. Schlußbetrachtung

Das Unterfangen historischer Kirchtürme mit ihren großen Lasten, dem wenig tragfähigen historischen Mauerwerk aus Bruchsteinen und Kalkmörtel sowie der großen Empfindlichkeit der angebauten Kirchenschiffe gegenüber Setzungen, gehört zu den schwierigen Aufgaben, die Ingenieuren heute gestellt werden können.

Weder der Zustand der Türme noch der Baugrund können im voraus mit Sicherheit erkundet werden.

Die Aufgabenstellung ist so selten, und Vergleiche mit anderen Aufgaben sind kaum möglich, so daß also weder für die einzusetzenden Konstruktionen noch für das Durchführen der Arbeiten ausreichend Erfahrungen vorliegen.

Die Folgen von Unterfangungen sowohl für die Turmbauten selbst als für die Kirchenbauten sind nicht sicher voraussehbar.

Das alles sollte Bauherren und Ingenieure davor warnen, solche Arbeiten leichtfertig und ohne Not anzupacken.

Das Unterfangen von Türmen muß die „Ultima ratio“ bleiben, wenn es gar keinen anderen Ausweg mehr gibt.

Die Haltung der italienischen Kollegen, die vor einer „Sicherung“ des Schiefen Turmes zu Pisa trotz des dort extremen Zustandes zurückschrecken, erscheint durchaus verständlich und vernünftig.

Wenn man aber zu einer solchen Maßnahme gezwungen zu sein glaubt, dann muß sie auf das Sorgfältigste vorbereitet werden, auch wenn das viel Zeit und Geld kostet.

Für das Durchführen der Arbeiten kommen nur Firmen mit großen, möglichst einschlägigen Erfahrungen in Frage. Die kontinuierliche Besetzung der Baustelle mit

Ingenieuren und Polieren muß gewährleistet sein. Es muß ein gutes Vertrauensverhältnis zwischen allen Beteiligten herrschen.

Wenn ein solches Vertrauen in Braunschweig nicht vorhanden gewesen wäre, und wenn Ingenieure und Poliere sich nicht so eingesetzt hätten, dann wären die Arbeiten an den zeitweise unüberwindlich erscheinenden Schwierigkeiten bestimmt gescheitert.

Entsprechend gilt der Dank all denen, die durch ihren Einsatz schließlich den Erfolg herbeigeführt haben!